水稻精準農業體系
SPOT 影像與 Duncan 資料應用於水稻產量估測
43-60, 2003

SPOT 影像與 Duncan 資料應用於水稻產量估測

吳啓南*、蕭國鑫、廖子毅
工業技術研究院能源與資源研究所遙測與資訊研究室
E-mail: 690398@itri.org.tw

摘要 ---------- 44
一、前言 ---------- 44
二、影像資料獲取與影像前處理 ---------- 46
三、遙測水稻產量推估模式 ---------- 49
四、結果與討論 ---------- 51
五、結語 ---------- 57
六、誌謝 ---------- 58
七、引用文獻 ---------- 58
ABSTRACT ---------- 60

SPOT 影像與 Duncan 資料應用於水稻產量估測

吳啓南*、蕭國鑫、廖子毅
工業技術研究院能源與資源研究所遙測與資訊研究室
E-mail: 690398@itri.org.tw

摘要

本研究分別利用 SPOT 影像及 Duncan 多光譜資料的 NDVI、RVI 及 TVI 植生(被)指數，結合試驗田區坪割產量做爲預估水稻產量的基本資料；再採用具備五種理想化預測能力的逐步迴歸分析向後消去法建立統計迴歸模式，並推導出預估水稻產量的方程式。分析結果如下: (一)結合 91 年 04/18 與 05/28 的 Duncan 資料與水稻坪割資訊，除建立水稻產量模式外；推估 75~89 等八區單號田的產量均方根誤差爲 0.436 與 0.229 公噸/公頃，另推估 81、83 及 87 等四種不同氮肥力區水稻產量均方差分別爲 0.967 與 0.989 公噸/公頃。評估誤差來源除了原始坪割位置代表性外；獲取影像時的 BRDF 效應，使小區取樣之光譜讀值偏移應爲主因。(二) SPOT 多時資料建立的推估水稻產量方程式，預估 91 年二期稻空間產量；預估最高分蘗期、最高分蘗期~抽穗期、最高分蘗期~乳熟期的標準差爲 0.738、0.717 及 0.719 公噸/公頃。評估造成差異因素爲 91 年的生長環境有利於水稻產量提昇；而建立的推估產量方程式以 89 年的水稻產量爲迴歸基準，但 89 年的水稻產量低於 91 年的產量；故以 89 年影像爲正規化比對基準，雖然將波譜反射值調爲接近，但推估的水稻產量會隨之降低。(三) 91 年 SPOT 資料建立的水稻產量方程式預估 92 年一期作產量；利用最高分蘗期、最高分蘗期~孕穗期、最高分蘗期~抽穗期及最高分蘗期~乳熟期影像推估水稻產量標準差爲 0.706、1.409、0.791 及 0.530 公噸/公頃；後者若移除第 89 田區異常值，該田缺氮及沒追肥，則推估水稻產量標準差降爲 0.437 公噸/公頃。(四)評估 92 年一期稻作的產量與氮肥力關係；由於是採用 91 年度產量模式來預測，當時模式發展時並未考慮氮變異施肥，因此預測結果未能反映出高氮及低氮田區的產量變化趨勢,尤其是高氮田區。本年度後續工作將把氮變異施肥田區加入模式發展，並驗證其對產量估測之效。

關鍵詞：水稻產量、迴歸分析、遙測。

一、前言

遙測資料具有高處俯視及多時段獲取影像特性，可密集監測農作物全生育期(full-growth-period)的生長狀況；並藉由多光譜資料的分析來辨別水稻與他種作物的區別，進而預估水稻種植面積及偵測稻作因病蟲

害或肥力不足引起的異常狀態，以快速取得作物異常區範圍後，做有效的防制與追蹤，並提供作爲逆境預警、災害防治或農作施肥的基本資料。另外亦可藉助電腦的快速分析影像資料，再結合作物產量預估模式，提前估測水稻空間產量。

目前臺灣地區的遙測資料中，SPOT 資料是可取得的影像中來源較爲穩定者；且 SPOT 影像的 NDVI 植生指數與其它遙測資料的相關係數達 0.92 已上(吳等；2000)；所以可再結合多種遙測資料分析，以找出最佳遙測水稻監測模式。另外 Duncan MS3100/CIR 地面多光譜近紅外成像儀可同時拍攝綠光、紅光及對植生反應最敏感、訊號最強的近紅外光波段影像；除可輔助地眞調查外，在天候不佳、空中或太空遙測資料無法獲得情況下，此系統亦可結合其它資訊或現場調查資料進行研判分析，以發揮地面監測作用。如能資所利用 Duncan 多光譜近紅外光成像儀進行作物監測方面，初步證實逆境環境與正常生長的水稻光譜反射有所不同(吳等，2001)。因此，本研究即利用具近紅外光波段及同時可獲取紅與綠波段的成像光譜儀攝像系統，除組合成假色影像外，並對水稻生育期及逆境環境下之光譜差異進行偵測，再結合空中遙測影像實施比對與分析。

理想上，作物的生長狀態及產量預估可利用一個農作物模式(crop model)準確加以描述。經結合作物生長模式(crop growth model)及溫度、日照、水及土壤肥力等各種環境因子，便能充分描述農作物每日的生長狀態，乃至收割時之產量。由於作物生長模式輸入參數眾多且複雜；因此，乃有簡化的預測作物產量模式被提出。如使用單一時期或多時期影像的植生指數(Tucker *et al.*, 1980)加以分析，以推估農作物產量。

第五屆“遙測在精準農業的應用”會程中，Scott and Taylor (2000)利用遙測影像的各種植生指數，如 NDVI、DVI 及 GNDVI 指數，分析其與玉米產量之間的關係，發現 GNDVI 指標預測相關性最高可達 0.93（R^2）; Yang and James (2000)以五個時間的綠/紅/紅外多譜影像及 NDVI 指數，利用多元迴歸分析法分析與玉蜀黍（Sorghum）產量間的關係，發現在最大分蘗期後的影像資料與產量之相關性最爲顯著，並以 NG 指標(NIR/Green)最適合於產量預測。另 Prince (1990)及 Los (1998)亦指出，作物的初級生產率(Primary productivity)間接與 NDVI 指數相關；Maselli 與 Rembold(2001)也成功的利用 13 年 AVHRR 衛星 NDVI 指數，推估摩洛哥(Morocco)、阿爾及利亞(Algeria)、突尼西亞(Tunisia)與埃及(Egypt)等四個國家大面積的穀物產量，其中 NDVI 指數與產量的相關性（R^2）均在 0.65 以上，摩洛哥國家更高達 0.93。目前臺灣地區的稻米產量估測爲利用數千點坪割資料統計而得，但需要在稻米全部收割後才能得到全省的產量資訊；雖然獲得相對較正確的產量資料，但仍爲粗估資料。因此，就此產量推估技術乃結合水稻植被光譜與地眞資料，藉由整合各種遙測資料的光譜反射與田間產量資料，以建立水稻植被光譜與產量之相對較合理的對應關係，再推展到往後的水稻空間產量預估。

另外與作物產量息息相關者爲土壤中氮肥力的多寡,如 Scharf(2000)研究發現玉米含氮量愈高則產量愈高,但有一臨界點,且氮的光譜反射尖峰在波長 550 微米處；Serrano(2000)則發現缺氮小麥在紅光有較強反射,在近紅外光則反射較弱; 水稻應有類似反應,且其氮變異對產量的影響應可反應在光譜的變化上。由於氮素是水稻全生育期中重要的肥力來源，在不同生長期對於氮的吸收量會不同，所以稻株的型態和產量構成要素亦會相異，而產量也隨之變動(林等，1981；1982)。其中營養生長期

和幼穗形成期是兩個氮素供應重要關鍵時段，若有足夠的氮素供應，即可得到好的生產株型與高的產量(張，1988)。而目前的水稻氮肥力管理，主要補充階段分成基肥、2~3 次的追肥和穗肥施用，但仍多憑農民個人之經驗決定施肥的時間與用量，尚不能達到依稻株體內氮營養狀況而施用的精準管理。因此，研究中亦針對精準農業實驗田，規劃多區施予不同肥力的氮素，再利用多時段 SPOT 影像與 Duncan 成像儀資料分析光譜上的差異，並預估其水稻空間產量。

二、影像資料獲取與影像前處理

研究中使用的影像爲 Duncan 多光譜成像儀資料及 SPOT 衛星資料。其中 Duncan 資料爲利用直昇機載台(platform)獲得，獲取的影像因大氣條件不同，且幾何位置與實際地表亦有差異，所以需要經過大氣和幾何校正等影像前處理步驟。SPOT 影像因缺乏攝像當時的探空資料提供絕對輻射校正，故以相對輻射校正的影像正規化(normalization)進行之；而影像幾何條件因錄回的資料爲 Level-10 正射影像資料，所以無須再進行幾何對位的處理工作。

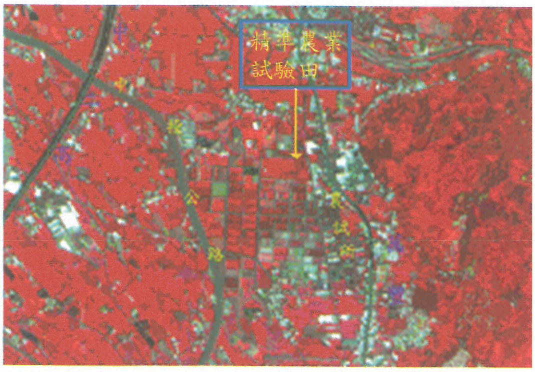


圖 2.1. 精準農業實驗田範圍圖。
(SPOT 影像:攝像日 2003/05/31)

(一)Duncan 資料與影像前處理

1.Duncan 資料獲取

Duncan 多波段攝像系統的拍攝鏡頭角度(FOV)約爲 20 度，而每幅影像大小爲 1392(pixels)*1039(lines)；因此，若拍攝高度低於 380 公尺時的影像空間解像力均屬公分級；如在高度 15 公尺地方所拍攝的影像之空間解像力爲 0.39 公分。爲了使 Duncan 成像資料能在一次拍攝影像中涵蓋精準農業實驗田範圍，並保持高解像力資料；因此，乃將 Duncan 攝像系統懸掛在空載直昇機載台下，並配合水稻最高分蘗期~幼穗形成期的生育狀況，規劃在 1,200~1,800 公尺地區進行三次的空載攝像工作(空間解像力爲 30~45 公分)。

進行飛航攝像時，配合中興大學施行熱波段影像資料獲取，故實際飛航高度相對地面高在 600~800 公尺間；換算爲地面空間解像力，每個像元約爲 15~20 公分。而依此高度拍攝的一幅影像涵蓋範圍在 208*156~278*208 平方公尺之間，故難以在一幅影像中即涵蓋實驗田範圍(如圖 2.1 所示)；因此，實際拍攝影像時爲在實驗田上空不同地區，配合 GPS 資料輔助分別獲取多幅的 Duncan 影像。如圖 2.2 即爲 2003/04/28 日獲取的 Duncan 原始影像。

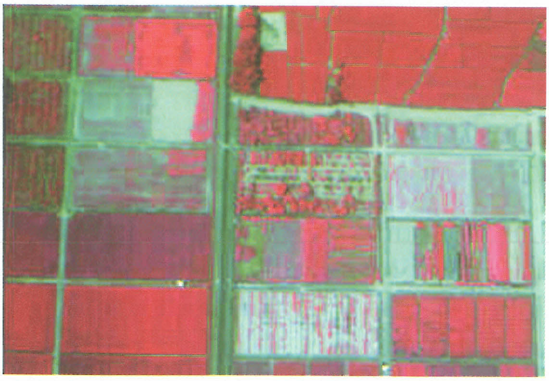


圖 2.2. 2003/04/28 之 Duncan 原始影像。

2.Duncan 資料大氣校正

Duncan 系統於空載攝像時，受到不同大氣的干擾而影響影像品質；於是攝像當時乃在地上置放了標準白板，並結合中興大學於實驗田周圍安置六個地點的白布與黑布輻射資料，據以換算為地表反射率；而不同田區影像間亦可以綜合進行光譜分析；因此，未進行雙向反射分布函數之進一步處理。

由於 Duncan 設計上僅取用 NIKON/TAKINA 之非球面鏡頭中央視域約 20 度範圍，鏡頭光學損失與地表反射變化有限；而檢視影像分布於中央與邊緣區域的白板及水稻田平均的灰階值變化小於 6，約僅 2% (6/255)的誤差。

3.Duncan 資料幾何校正

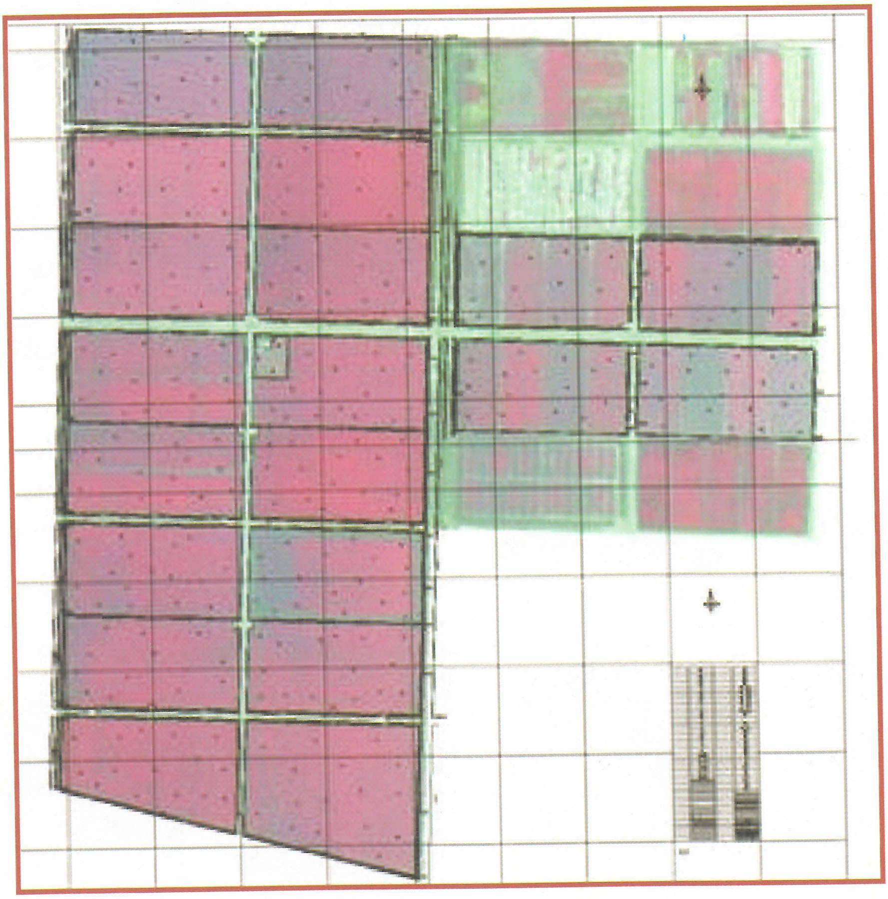


圖 2.3. 經過輻射與幾何校正後的實驗田 Duncan 影像。

Duncan 系統的成像原理與中心投影近似，即影像中心點與周圍地區因投影後的成像條件並不一致，所以影像的幾何形狀與真實地表會有些許改變；加上空載攝像時的直昇機載台穩定性不夠，所以無法保證獲取得影像為垂直攝影所得。為了確保影像的幾何品質，於是配合地面控制點的選取，分幅進行地理對位(geo-coded)，利用能夠保持影像原始資訊的最鄰近法(nearest neighbor)進行多波段影像的重新取樣，最後進行影像合併工作。如圖 2.3 即

爲經過輻射與幾何校正後的實驗田 Duncan 影像，地面解析度爲 25 公分，約略大於稻作的植株間隔 2.4 倍。另外因爲像元解析力仍大於水稻植株間隔，因此不均勻覆蓋影像不會發生，所有灰階與植生指數變化除系統誤差外皆可視爲水稻田的生長差異。

(二)SPOT 資料影像前處理

獲取多時段 SPOT 資料時，影像品質會因不同大氣條件的干擾，所以地面上近於不變地物的光譜反射值會產生差異。在沒有攝像當時的大氣探空資料提供絕對大氣輻射校正時，相對的輻射校正仍是必須的。研究中以 2000/06/24 的 SPOT 影像爲基準，其他時間的影像資料均與此日期的影像進行相對的輻射校正，即進行影像正規化的工作。如圖 2.4 即爲 91 年二期稻與 92 年一期稻作期間獲取的正規化 SPOT 影像。另外亦考慮波段比例法亦可以減少部份大氣效應，所以再利用正規化後的比例影像資料進行分析。如正規化差異植生指數(NDVI)、比例植生指數(RVI)與轉換植生指數(TVI)等三種均具有紅外光段與紅光段比值的指數方法。

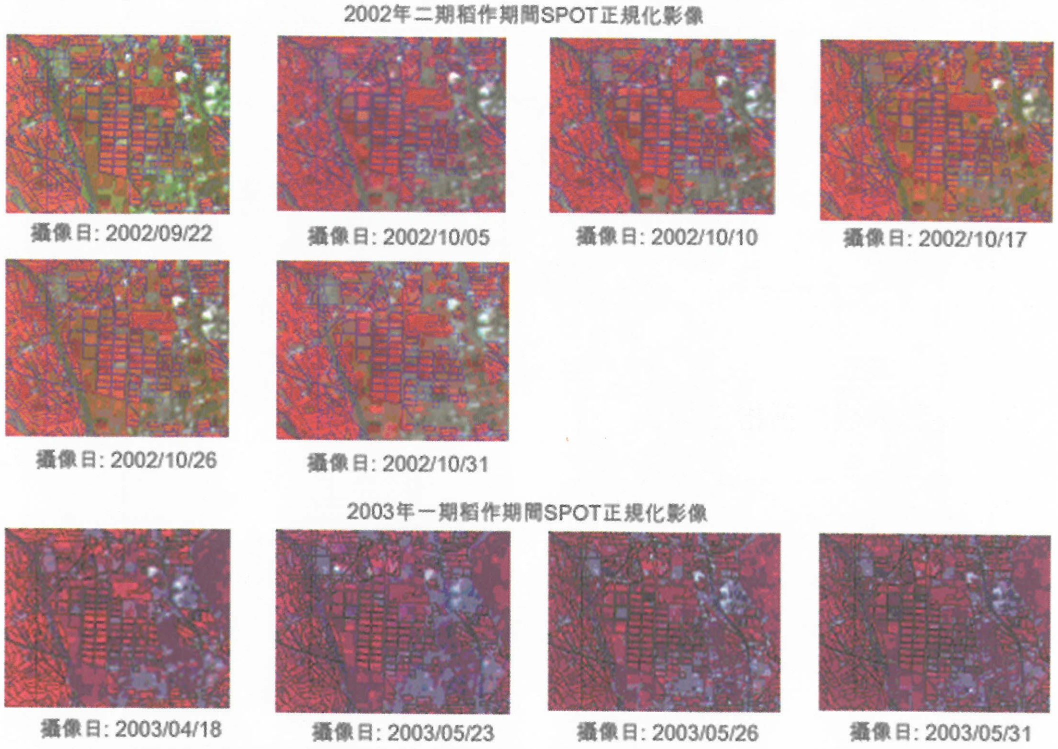


圖 2.4. 91 年二期稻與 92 年一期稻作期間獲取的正規化 SPOT 影像。

農試所規劃實驗田坵塊面積均爲 0.5 公頃，對應到 SPOT 影像後的坵塊中心三個網格爲水稻純像元(pure pixel)；所以先採用翰林濾波(Hanning filter)法，統計各坵塊代表的水稻波譜反射值後，再計算 NDVI、RVI 及 TVI 植生指數(如表 2.1 所示)。另水稻實際產量資料則計算各坵塊 8 小區坪割資料中的中間 4 小區的平均值，以代表水稻田間產量。最後再利用 SPOT 影像轉換的三種指數，配合田間坪割產量，建立遙測水稻產量推估模式，並估測水稻的空間產量分佈。

表 2.1. 92 年一期稻作期間 SPOT 正規化影像之 NDVI、RVI 及 TVI 指數值。

日期	NDVI				RVI				TVI			
編號	04/20	05/23	05/26	05/31	04/20	05/23	05/26	05/31	04/20	05/23	05/26	05/31
38	0.348	0.358	0.366	0.353	2.073	2.114	2.166	2.096	0.921	0.926	0.931	0.924
39	0.508	0.474	0.479	0.461	3.076	2.805	2.860	2.717	1.004	0.987	0.989	0.980
42	0.504	0.442	0.381	0.381	3.053	2.596	2.233	2.234	1.002	0.971	0.938	0.939
43	0.450	0.438	0.445	0.431	2.634	2.558	2.609	2.515	0.974	0.968	0.972	0.965
74	0.615	0.566	0.507	0.472	4.206	3.609	3.061	2.786	1.056	1.032	1.004	0.986
75	0.624	0.584	0.522	0.489	4.319	3.806	3.185	2.916	1.060	1.041	1.011	0.995
76	0.632	0.527	0.473	0.434	4.447	3.234	2.794	2.532	1.064	1.014	0.986	0.966
77	0.638	0.600	0.512	0.463	4.533	4.001	3.097	2.725	1.067	1.049	1.006	0.981
78	0.512	0.499	0.473	0.443	3.137	3.011	2.811	2.602	1.006	0.999	0.986	0.971
79	0.605	0.573	0.538	0.494	4.060	3.679	3.327	2.949	1.051	1.036	1.019	0.997
80	0.685	0.572	0.494	0.457	5.388	3.668	2.951	2.685	1.089	1.035	0.997	0.978
81	0.540	0.491	0.423	0.428	3.359	2.933	2.465	2.498	1.020	0.996	0.961	0.963
82	0.623	0.557	0.534	0.478	4.324	3.515	3.288	2.833	1.060	1.028	1.017	0.989
83	0.545	0.487	0.439	0.454	3.394	2.899	2.563	2.662	1.022	0.993	0.969	0.977
84	0.644	0.537	0.475	0.442	4.630	3.323	2.809	2.588	1.070	1.018	0.987	0.971
85	0.641	0.524	0.432	0.402	4.567	3.207	2.519	2.346	1.068	1.012	0.965	0.950
86	0.649	0.509	0.486	0.432	4.706	3.071	2.893	2.524	1.072	1.004	0.993	0.966
87	0.672	0.538	0.517	0.469	5.094	3.329	3.139	2.769	1.082	1.019	1.008	0.985
88	0.522	0.466	0.433	0.384	3.185	2.747	2.527	2.246	1.011	0.983	0.966	0.940
89	0.545	0.440	0.403	0.377	3.394	2.574	2.353	2.212	1.022	0.970	0.950	0.936

三、遙測水稻產量推估模式

遙測水稻產量推估利用最高分櫱期(maximum tillering stage)以後，經過正規化的影像資料；並以 NDVI、RVI 與 TVI 等三種植生指數，配合坪割資料進行統計分析，再以線性多元迴歸（linear multiple regression）模式推導出迴歸方程式，從而建立遙測水稻產量推估模式(吳啓南、等；2001)。

(一)遙測水稻產量推估模式

水稻產量和遙測影像的線性多元迴歸模式推求方式如下：

$$Y = X\beta + \sum \qquad (3\text{-}1)$$

Y：水稻產量估測值； X：多光譜影像各種指數值

$\sum$：隨機誤差； β：求解之迴歸係數

選擇適於預測水稻產量推估最佳資料，採用向後消去法逐步迴歸分析（stepwise regression by backward elimination）決定最佳水稻產量預測模式。其中具理想化預測能力的統計迴歸模式需滿足(1)評估統計量 ti (t-statistic)應≧2.0 (2)變異數分析之 F-test 與 F 値在 α =5%時之比値應≧4.0 (3)評估推定値與實測値誤差量應接近於 0 (4)迴歸係數是否趨近於 1 (5)標準化期望總推定差與推定係數個數比 Ck/(k+1)≦1.0 等五種評估標準(吳等，1989)。

遙測水稻產量迴歸分析完畢，即依迴歸方程式輸入常數及顯著指數的資料，並進行大面積的水稻空間產量推估。估算方式如(3-2 式)所示：

$$Y = K_0 + K_1(B_1) + K_2(B_2) + ... \qquad (3\text{-}2)$$

(3-2)式中，Y 爲遙測推估水稻產量估計值，Bi 爲各顯著波段的波譜亮度值或植生指數值，並不是各波段的輻射量；Ki 爲各顯著波段對應的迴歸係數。

(二)遙測水稻產量推估方程式建立

遙測水稻產量推估模式利用如圖 3.1 步驟的多元迴歸分析結果，逐次建立兩期稻作的空間產量推估方程式；Fy91 一期稻及 Fy89 二期稻最佳預測模式如表 3.1 所示。其中一期作期間綜合四幅影像與坪割資料的迴歸相關係數雖然達 0.87，標準誤差 0.32 公噸/公頃，但 F-test 沒有通過 α =5%時之比值≧4.0 標準，所以尚未達理想化的統計標準。二期稻作期間則具有理想化統計預測能力，且結合最高分櫱期~乳熟期四幅影像，對應水稻坪割產量的迴歸相關係數達 0.93，統計標準差 0.36 公噸/公頃。

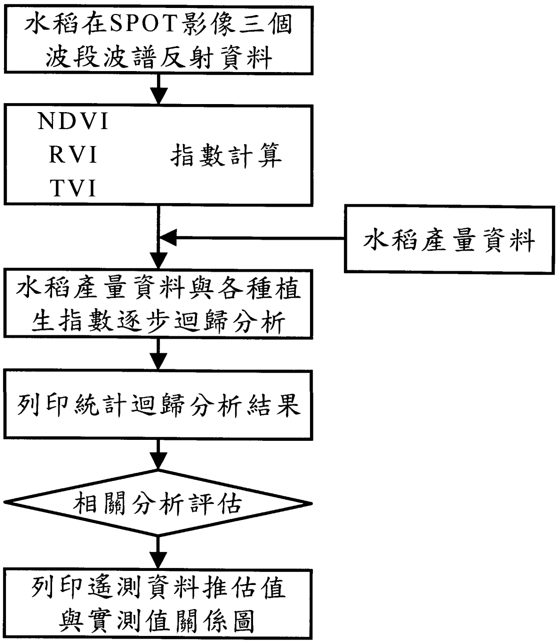


圖 3.1. 遙測水稻空間產量推估流程圖。

表 3.1. 農試所實驗田兩期稻作預估水稻產量多元迴歸分析結果。

對照水稻生育期	水稻期別	F(0.05)	標準誤差	迴歸相關係數	迴 歸 方 程 式
最高分櫱期	91一	10.1184	0.413	0.6000	Y=-2.49983+8.62910*T(1)
最高分櫱期~孕穗期	91一	6.6424	0.340	0.7995	Y=-26.3501+210.1261*N(2)-24.1149*R(2)-84.4958*T(1) +87.6449*T(2)
最高分櫱期~抽穗期	91一	10.6414	0.354	0.7456	Y=-7.39665+82.3884*N(2)-9.18160*R(2)
最高分櫱期~乳熟期	91一	5.1167	0.317	0.8655	Y=325.338-16.6527*N(1)+166.3649*N(2)-8.1672*N(3)+ 248.3428*N(4)-16.5794*R(2)+2.0027*R(3)-467.867*T(4)
最高分櫱期	89二	7.0254	0.624	0.6727	Y=-78.63325-62.50304*N(1)+115.47020*T(1)
最高分櫱期~孕穗期	89二	12.6686	0.480	0.8389	Y=92.06286-71.53019*N(1)+2.04536*R(2)+126.26520*T (1)
最高分櫱期~抽穗期	89二	12.6686	0.480	0.8389	Y=-92.06286-71.53019*N(1)+2.04536*R(2)+126.26520* T(1)
最高分櫱期~乳熟期	89二	13.6914	0.361	0.9292	Y=1054.568-88.25141*N(1)+272.8497*N(2)+550.9645* N(4)+159.6314*T(1)-518.6057*T(2)-1058.084*T(4)

附註: 最高分櫱期(1)、孕穗期(2)、抽穗期(3)、乳熟期(4)；NDVI 指數:N(1-4)；RVI 指數:R(1-4)；TVI 指數:T(1-4)

四、結果與討論

配合精準農業之試驗研究，農試所規劃多區實驗田為不同肥力之氮變異區(如圖 4.1 所示)，以評估不同的氮施肥區對產量之影響；再配合不同的遙測資料進行水稻空間產量的推估。

(一)Duncan 影像分析結果

Duncan 資料推估水稻產量推估模式亦如 3.1 節所述；不同者為其具有較佳的空間解析能力，可提供地面公分級的產量分析資料，但實際有效網格視地面採樣(坪割)尺度而定。如 92 年度坪割資料為將實驗田劃分的八小區中，每一小區均隨機圈定坪割區域，並代表此小區的平均產量；所以 Duncan 各田區影像暫時以八小區進行像元平均，而推估產量模式之有效尺度亦由 1.4 公尺(坪割週界長)降至 25 公尺。

89	88		
87	86		
85	84	43	42
83	82	39	38
81	80		
79	78		
77	76		
75	74		

(a)實驗田編號

穗肥不施-N65	N65		
N120	穗肥不施-N130		
穗肥不施-N130	正常管理-N130	四種氮變級	四種氮變級
N210基穗肥調整	正常管理	四種氮變級	四種氮變級
N210基穗肥調整	N210		
正常管理	正常管理		
正常管理	正常管理		
正常管理	正常管理		

(b)氮變異區施肥分布圖

圖 4.1. 農試所精準農業試驗田 Fy92 一期稻氮變異區分佈圖。

表 4.1 為 Duncan 在 2002 年 4 月 18 日攝取影像中相對各田區之光譜參數。其中的 IARR(Internal Average Relative Reflectance)運用於三光譜波段，可以降低大氣影響；而 NDVI、RVI 與 TVI 植生指數均具對植被特別敏感的近紅外光段資料參與比值貢獻，對於估測與水稻產量相關的葉綠素具有物理性的意義。

91 年一期稻作期間的 Duncan 產量模式依田區肥力施作狀態，可分為四組預測水稻產量資料(如表 4.2 所示)；如代表 62%生長期(04/18，最高分櫱期)與 94%生長期(05/28，黃熟期)的水稻產量推估模式及不同氮肥力區水稻生長模式。若將表 4.2 的四個迴歸方程式分別代入 Duncan 資料，則可得到如表 4.3 與表 4.4 所示之水稻產量推估資料。

而由圖 4.2 可顯示預測水稻產量與坪割資料的誤差分布；其中利用 Duncan 資料的預測值與實際坪割資料坐落於對角線者，代表推估結果準確度高。經計算預測值與坪割產量的標準差(RMS)後，統計 04/18 的誤差量為 0.436 公噸/公頃，而 05/28 的誤差量為降為 0.229 公噸/公頃；另外計算氮變異區的水稻產量推估結果，評估的標準差提升為 0.969 公噸/公頃及 0.989 公噸/公頃。

表 4.1. 2002 年 4 月 18 日全區 Duncan 參數對照表。

田號	小區	產量	NIR	R	G	IARR NIR	IARR R	IARR G	NDVI	RVI	TVI
87	A1	6.17	193.327	33.531	68.265	1.091	1.270	1.178	-0.076	0.859	0.651
87	B1	7.03	212.678	29.133	63.378	1.200	1.103	1.094	0.042	1.088	0.736
87	C1	4.91	205.056	26.456	59.744	1.157	1.002	1.031	0.072	1.155	0.756
87	D1	4.96	196.689	27.133	67.433	1.110	1.027	1.163	0.039	1.080	0.734
87	A2	4.89	187.900	32.144	66.133	1.060	1.217	1.141	-0.069	0.871	0.657
87	B2	6.99	204.078	29.500	62.067	1.152	1.117	1.071	0.015	1.031	0.718
87	C2	4.87	200.778	26.456	58.722	1.133	1.002	1.013	0.061	1.131	0.749
87	D2	3.64	193.533	28.000	68.111	1.092	1.060	1.175	0.015	1.030	0.718
83	A1	4.89	185.163	31.041	65.286	1.045	1.175	1.126	-0.059	0.889	0.664
83	B1	4.45	175.918	29.388	67.408	0.993	1.113	1.163	-0.057	0.892	0.666
83	C1	4.66	188.714	24.735	59.020	1.065	0.937	1.018	0.064	1.137	0.751
83	D1	6.52	194.551	22.204	54.143	1.098	0.841	0.934	0.133	1.306	0.795
83	A2	6.4	173.735	31.429	64.204	0.980	1.190	1.108	-0.097	0.824	0.635
83	B2	4.55	165.612	31.245	68.306	0.935	1.183	1.179	-0.117	0.790	0.619
83	C2	5.11	178.245	25.265	58.224	1.006	0.957	1.005	0.025	1.051	0.725
83	D2	6.61	176.245	22.143	51.776	0.995	0.838	0.893	0.085	1.186	0.765
81	A1	4.65	148.000	25.429	54.898	0.835	0.963	0.947	-0.071	0.867	0.655
81	B1	4.17	159.204	22.796	51.245	0.898	0.863	0.884	0.020	1.041	0.721
81	C1	6.4	141.265	24.020	26.122	0.797	0.910	0.451	-0.066	0.876	0.659
81	D1	4.41	153.286	18.388	45.469	0.865	0.696	0.785	0.108	1.242	0.780
81	A2	4.87	151.592	27.163	56.878	0.855	1.029	0.981	-0.092	0.832	0.639
81	B2	3.85	161.796	24.102	52.592	0.913	0.913	0.907	0.000	1.000	0.707
81	C2	6.59	146.673	22.939	54.776	0.828	0.869	0.945	-0.024	0.953	0.690
81	D2	6.09	158.837	19.163	46.776	0.896	0.726	0.807	0.105	1.235	0.778

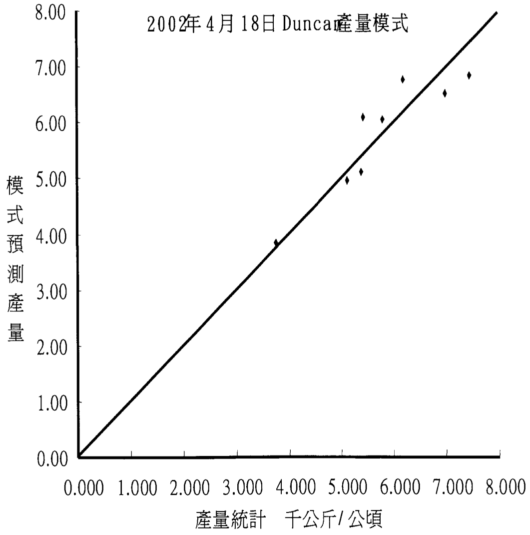
表 4.2. 91 年 Duncan 水稻產量模式。

91 年產量模式區分	迴 歸 方 程 式
全區產量模式 I	產量 = 3.926 + 11.011 NIR - 6.005 Red - 3.168 Green
全區產量模式 II	產量 = 69.457 + 82.769 NIR - 52.356 Red - 32.791 Green - 60.443 RVI
氮變異區產量模式 I	產量 = 3.766 + 5.689 NIR - 4.126 Green - 3.817 NDVI
氮變異區產量模式 II	產量 = 1.045 + 3.331 NIR - 1.263 NDVI + 0.929 RVI

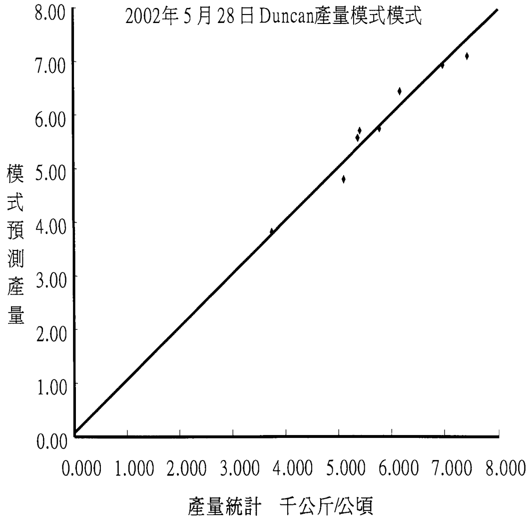
產量：千公斤/公頃； NIR、Red、Green、RVI、NDVI：reflectance index

表 4.3. 2002 年 4/18 與 5/28 日 Duncan 全區模式推估水稻產量估計誤差。

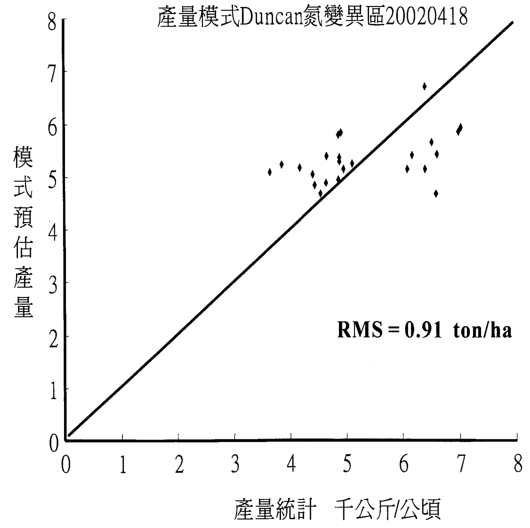
田區編號	2002/04/18 日水稻產量推估結果			2002/05/28 日水稻產量推估結果		
	產量統計 公噸/公頃	估計產量 公噸/公頃	估計誤差 公噸/公頃	產量統計 公噸/公頃	估計產量 公噸/公頃	估計誤差 公噸/公頃
89	3.750	3.83	-0.083	3.750	3.96	-0.205
87	5.430	6.08	-0.646	5.430	5.35	0.081
85	6.990	6.51	0.476	6.990	7.56	-0.567
83	5.390	5.11	0.280	5.390	6.02	-0.627
81	5.120	4.95	0.173	5.120	5.29	-0.170
79	5.800	6.04	-0.238	5.800	6.14	-0.336
77	6.190	6.77	-0.575	6.190	5.99	0.201
75	7.440	6.83	0.609	7.440	7.31	0.134
	產量= 3.926 +11.011 NIR - 6.005 Red -3.168 Green RMS error = 0.436 公噸/公頃			產量 = 69.457 + 82.769 NIR - 52.356 Red - 32.791 Green - 60.443 RVI RMS error = 0.229 公噸/公頃		



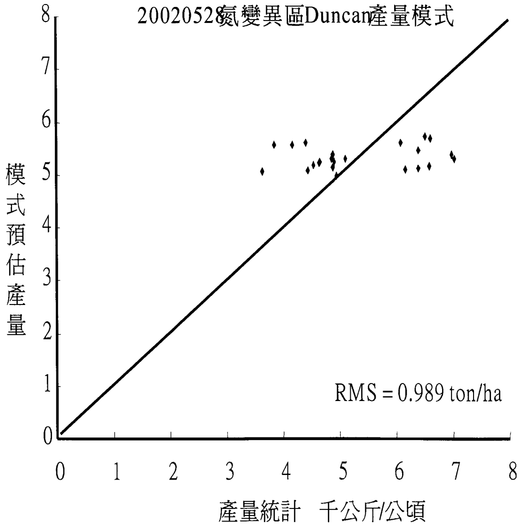
(a) 2002/04/18全區推估結果



(b) 2002/05/28全區推估結果



(a) 2002/04/18氮變異區推估結果



(b) 2002/05/28氮變異區推估結果

圖 4.2. Duncan **影像推估** 91 **年水稻產量與坪割資料採樣值分布。**

表 4.4. 2002 年 4/18 與 5/28 日 Duncan 氮變異區模式推估 92 年水稻產量估計誤差。

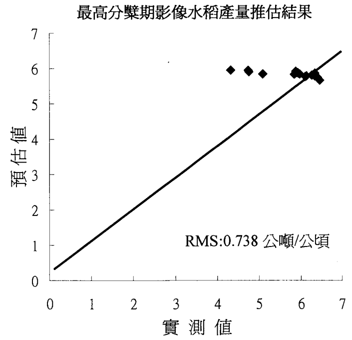
田區編號	小區	2002/04/18 日水稻產量推估結果			2002/05/28 日水稻產量推估結果		
		產量統計 公噸/公頃	估計產量 公噸/公頃	估計誤差 公噸/公頃	產量統計 公噸/公頃	估計產量 公噸/公頃	估計誤差 公噸/公頃
87	A1	6.17	5.40	0.77	6.17	5.09	1.08
87	B1	7.03	5.92	1.11	7.03	5.30	1.73
87	C1	4.91	5.82	-0.91	4.91	5.23	-0.32
87	D1	4.96	5.13	-0.17	4.96	4.98	-0.02
87	A2	4.89	5.35	-0.46	4.89	5.14	-0.25
87	B2	6.99	5.84	1.15	6.99	5.39	1.60
87	C2	4.87	5.80	-0.93	4.87	5.29	-0.42
87	D2	3.64	5.07	-1.43	3.64	5.06	-1.42
83	A1	4.89	5.29	-0.40	4.89	5.38	-0.49
83	B1	4.45	4.83	-0.38	4.45	5.07	-0.62
83	C1	4.66	5.38	-0.72	4.66	5.24	-0.58
83	D1	6.52	5.65	0.87	6.52	5.73	0.79
83	A2	6.4	5.14	1.26	6.4	5.46	0.94
83	B2	4.55	4.67	-0.12	4.55	5.18	-0.63
83	C2	5.11	5.25	-0.14	5.11	5.31	-0.20
83	D2	6.61	5.41	1.20	6.61	5.70	0.91
81	A1	4.65	4.88	-0.23	4.65	5.21	-0.56
81	B1	4.17	5.15	-0.98	4.17	5.56	-1.39
81	C1	6.4	6.69	-0.29	6.40	5.13	1.27
81	D1	4.41	5.04	-0.63	4.41	5.60	-1.19
81	A2	4.87	4.93	-0.06	4.87	5.30	-0.43
81	B2	3.85	5.22	-1.37	3.85	5.57	-1.72
81	C2	6.59	4.67	1.92	6.59	5.17	1.42
81	D2	6.09	5.13	0.96	6.09	5.61	0.48
產量 = 3.766 + 5.689 NIR - 4.126 Green - 3.817 NDVI RMS error = 0.967 公噸/公頃					產量 = 1.045 + 3.331 NIR - 1.263 NDVI + 0.929 RVI；RMS error = 0.989 公噸/公頃		

(二)SPOT 影像分析結果

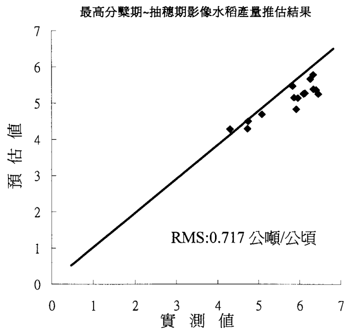
1.91 年二期水稻空間產量推估結果

以 SPOT 多時影像與水稻坪割資料建立的遙測水稻產量方程式，再利用 91 年二期稻作期間攝像日期接近的四幅影像，預估水稻空間產量，預估結果如表 4.5 所示。其中在最高分蘗期影像推估結果，水稻產量標準差 0.74 公噸/公頃；結合幼穗形成期~孕穗期或抽穗期影像預估的標準差爲 0.72 公噸/公頃；再結合乳熟期影像的產量標準差爲 0.72 公噸/公頃。圖 4.3 爲推估 91 年二期水稻產量後，再比對農試所水稻坪割產量之實測值與預估值關係圖。

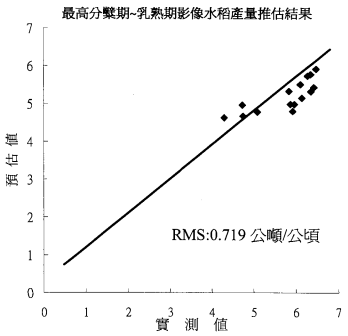
SPOT 影像推估 91 年二期水稻水稻空間產量之實測值與預估值關係圖



(a)最高分櫱期影像

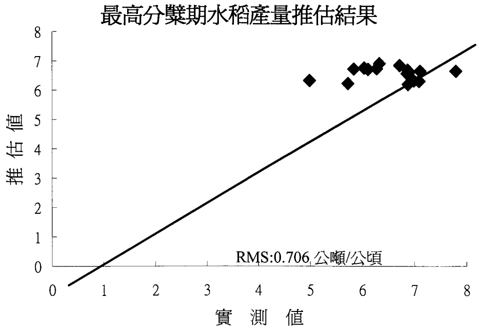


(b)最高分櫱期~抽穗期影像

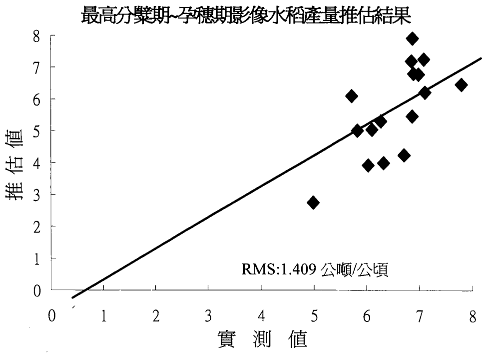


(c)最高分櫱期~乳熟期影像

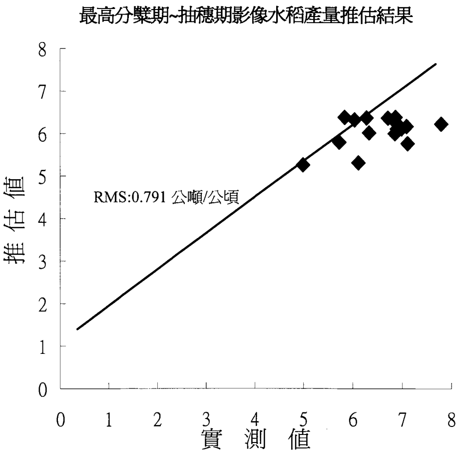
SPOT 影像推估 92 年一期水稻空間產量之實測值與預估值關係圖



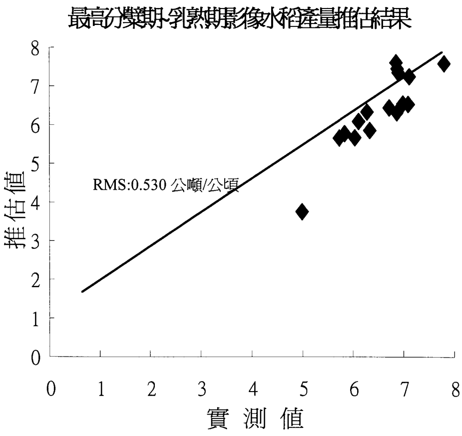
(a)最高分櫱期影像



(b)最高分櫱期~孕穗期影像



(c)最高分櫱期~抽穗期影像



(d)最高分櫱期~乳熟期影像

圖 4.3. SPOT 影像推估水稻空間產量之實測值與預估值關係圖。

表 4.5. **遙測水稻產量推估方程式預估 91 年二期稻與 92 年一期稻空間產量分佈。**

編號	推估 91 年二期稻作產量(公噸/公頃)					預估 92 年一期稻作產量(公噸/公頃)					
	坪割產量	1	1~2	1~3	1~4	坪割產量	1	1~2	1~3	1~4	氮肥力
38	4.733	5.945	4.292	4.292	4.960	6.900	5.450	1.183	2.670	0.884	氮變異區
39	4.748	5.901	4.498	4.498	4.667	7.115	6.169	7.294	5.927	6.878	氮變異區
42	5.960	5.835	5.141	5.141	4.978	6.813	6.155	4.667	5.325	4.513	氮變異區
43	氮變異區	5.834	3.139	3.139	4.595	6.115	5.910	6.510	5.194	5.469	氮變異區
74	5.835	5.827	5.471	5.471	5.325	6.900	6.615	6.809	6.108	7.354	正常管理
75	6.335	5.781	5.785	5.785	5.772	7.115	6.648	6.223	5.762	7.252	正常管理
76	5.085	5.839	4.691	4.691	4.777	6.873	6.682	5.468	6.381	6.319	正常管理
77	6.340	5.860	5.387	5.387	5.320	6.115	6.706	5.042	5.310	6.088	正常管理
78	6.408	5.735	5.365	5.365	5.426	6.880	6.194	7.918	6.258	7.453	正常管理
79	6.263	5.804	5.666	5.666	5.730	6.858	6.570	7.199	5.996	7.609	正常管理
80	5.870	5.911	5.154	5.154	4.982	6.335	6.898	3.993	6.014	5.857	N210
81	氮變異區	5.616	3.676	3.676	4.360	7.095	6.304	7.258	6.166	6.534	N210
82			未種植水稻			7.800	6.647	6.475	6.223	7.591	正常管理
83	氮變異區	5.879	3.603	3.603	4.606	6.993	6.321	6.784	6.112	6.543	N210
84	6.098	5.761	5.261	5.261	5.504	6.283	6.731	5.309	6.365	6.334	N130
85	6.458	5.662	5.256	5.256	5.913	5.838	6.716	5.011	6.379	5.774	N130
86	6.133	5.784	5.275	5.275	5.150	6.040	6.752	3.919	6.319	5.668	N130
87	氮變異區	5.516	3.486	3.486	3.836	6.720	6.841	4.245	6.363	6.443	N120
88	5.923	5.864	4.834	4.834	4.797	5.728	6.224	6.099	5.793	5.657	N065
89	4.298	5.948	4.281	4.281	4.622	4.990	6.321	2.744	5.254	3.750	N065
	R.M.S.	0.738	0.717	0.717	0.719	R.M.S.	0.706	1.409	0.791	0.530	

1:最高分櫱期；2:幼穗形成期~孕穗期；3:抽穗期；4:乳熟期影像

2.92 年一期水稻空間產量推估結果

利用同 3.1 節所述的遙測水稻產量方式，預估 92 年一期稻作產量，推估結果亦如表 4.5 所示。其中最高分櫱期影像推估水稻產量標準差 0.71 公噸/公頃；結合幼穗形成期~孕穗期影像的標準差爲 1.41 公噸/公頃，另綜合抽穗期影像預估的標準差爲 0.79 公噸/公頃；再結合乳熟期影像的產量標準差則爲 0.53 公噸/公頃。圖 4.3 爲 SPOT 影像推估 92 年一期水稻產量後，再比對農試所水稻坪割產量之實測值與預估值關係圖。

(三)分析結果討論

本研究證實 Duncan 資料可以藉由高空作業車之幫助，以獲取、分析並建立可行之水稻產量模式；同時保有高空間的解析能力。而在 91 年一期作資料中，5 月 28 日影像推估水稻產量模式建立上優於 4 月 18 日影像資料；其產量推估之均方根誤差分別爲 0.229 公噸/公頃與 0.436 公噸/公頃。

Duncan 資料分析氮變異施肥田區建立的產量模式誤差較大；如 5 月 28 日與 4 月 18 日資料建立的產量模式，推估誤差分別爲 0.989 公噸/公頃與 0.967 公噸/公頃。誤差來源除了原始坪割位置代表性外，光譜參數分布中，過大的 BRDF 效應，使小區取樣之光譜讀值偏移應爲主因。由於此現象在斜攝獲取影像屬不可避免，所以未來系統應用時具有侷限性。而斜攝影像可以推估大面積田區的平均產量，但是像元級空間分布資訊則不可避免將需要 BRDF 校正；另一可行之做法便是將攝像系統以空中載台獲得垂直攝取影像，此可以部分降低水稻作物的表面 BRDF 影響。

利用 SPOT 資料建立的迴歸方程式預估水稻空間產量；其中預估 91 年二期稻的空間產量比對坪割資料後，預估最高分櫱期、最高分櫱期~抽穗期、最高分櫱期~乳熟期的標準

差爲 0.738、0.717 及 0.719 公噸/公頃，明顯地遙測推估產量較實際坪割平均產量低。造成此差異原因爲 91 年二期稻作期間的平均溫度較高，且水稻插秧後的累計日照量較多；生長環境的不同造成水稻產量提昇；而 91 年的多時段影像中，光譜資料乃以 89 年的影像爲基準進行影像正規化，雖然將光譜反射值調整爲接近一致，但 89 年的水稻產量原就低於 91 年的產量資料，所以推估水稻產量推估值亦因之而降低。

另外預估 92 年一期稻作的產量；利用最高分蘗期、最高分蘗期~孕穗期、最高分蘗期~抽穗期及最高分蘗期~乳熟期影像推估的標準差爲 0.706、1.409、0.791 及 0.530 公噸/公頃；其中若將缺氮及沒追肥的第 89 田區的異常差異去除，則利用最高分蘗期~孕穗期多時影像推估誤差可降爲 0.437 公噸/公頃。

評估 92 年一期稻作的產量與氮肥力關係，表 4.5 顯示利用以前發展的模式並無法反應氮變異田區的產量趨勢關係，因爲當時模式發展時並未涵蓋氮變異施肥田區。此問題將在後續工作中嘗試解決,利用保留給 SPOT 影像的數個整塊田區的資料來發展相應模式

五、結語

本研究利用 SPOT 影像及 Duncan 資料，利用 NDVI、RVI 及 TVI 三種指數及結合試驗田區產量資料，做爲預估水稻產量的基本資料；並採用逐步迴歸分析向後消去法，以具備(1)迴歸相關係數趨近於 1 (2)均方差接近於 0 (3)F-test 與 F 值在 $\alpha=5\%$時之比值≧4.0 (4)統計量 ti≧2.0 (5)標準化期望總推定差與推定係數個數比 Ck/(k+1)≦1.0 等五種理想化預測能力的統計迴歸模式爲評估基準，再推導出預估水稻產量方程式。分析結果討論與建議如下:

(一)利用 91 年一期稻作期間的 04/18 與 05/28Duncan 資料，除建立水稻產量模式外，推估坐落於實驗田左側的 75~89 單號田等八區，推估產量之均方根誤差分別爲 0.436 公噸/公頃與 0.229 公噸/公頃。另推估 81、83 及 87 等實驗田均分爲四種不同氮肥力區的產量，推估誤差分別爲 0.967 公噸/公頃與 0.989 公噸/公頃；評估誤差來源除了原始坪割位置代表性外，光譜參數分布中，過大的 BRDF 效應，使小區取樣之光譜讀值偏移應爲主因。

(二)以 SPOT 資料建立的迴歸方程式預估 91 年二期稻的空間產量，預估最高分蘗期、最高分蘗期~抽穗期、最高分蘗期~乳熟期的標準差爲 0.738、0.717 及 0.719 公噸/公頃。造成差異主原爲 91 年二期稻作期間的平均溫度較高，且累計日照量較多，生長環境的不同造成水稻產量提昇;而建立的推估水稻產量方程式以 89 年的水稻產量爲迴歸基準，但 89 年的水稻產量原就低於 91 年的產量，所以在以 89 年的影像爲正規化基準後，雖然將波譜反射值調爲接近，但推估的水稻產量會隨之降低。

(三) 91 年多時 SPOT 資料建立的水稻產量方程式預估 92 年一期稻作的產量；利用最高分蘗期、最高分蘗期~孕穗期、最高分蘗期~抽穗期及最高分蘗期~乳熟期的影像，推估的水稻產量標準差爲 0.706、1.409、0.791 及 0.530 公噸/公頃；其中若將第 89 田區的異常值去除，則最高分蘗期~孕穗期多時段影像推估產量誤差降爲 0.437 公噸/公頃。

(四)評估 92 年一期稻作的產量與氮肥力關係；由於是採用 91 年度產量模式來預測,當時模式發展時並未考慮氮變異施肥,因此預測結果未能反映出高氮及低氮田區的產量變化趨勢,尤其是高氮田區,低氮田區的預測趨勢則較合理。本年度後續工作將把氮變異施肥田區加入模式發展並驗證其效。

六、誌謝

本研究承行政院農委會 92 農科-1.1.6-農-C(01)之水稻生育狀況與環境監測系統~水稻生長、逆境及產量之監測與估測技術研究~SPOT 衛星與地面近紅外成像儀之監測應用計畫支援，農試所提供精準農業試驗田水稻產量資料，研究得以完成，深致謝忱。

七、引用文獻

吳啓南、蕭國鑫、廖子毅、徐偉城、劉治中。2000。運用空載多譜掃描及地面成像光譜儀監測水稻生育及自動辨識研究，工研院能資所第 063-89-W043 報告，共 70 頁。

吳啓南、蕭國鑫、廖子毅、徐偉城、劉治中。2001。SPOT 衛星與地面近紅外成像儀之監測應用，工研院能資所第 063-90-W011 報告，共 122 頁。

林鴻淇、鍾仁賜、涂秀麗。1981。溫度與光氣候及營養間之交感對水稻之發育與分化及營養生理的效應 II 對氮素吸收、分配及利用之影響，中國農業化學會誌 19:115-124。

林鴻淇、鍾仁賜。1982。光氣候、溫度和氮肥之交感對水稻不稔之影響，中國農業化學會誌 20:21-31。

張正賢。1988。稻作學精要。國立編譯館，臺北市。

吳啓南、蕭國鑫等七人。1989。遙測資料應用於二仁溪及北港溪水污染調查報告，工研院能資所 78 污染與公害防治專案計畫報告，共 141 頁。

Los, S.O. 1998. Linkages between Global Vegetation and Climate. *An Analysis Based on NOAA Advanced Very High Resolution Radiometer Data.* PhD. Dissertation. Vrije Universiteit, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, PP.179.

Maselli, F. and F. Rembold. 2001. Analysis of GAC NDVI Data for Cropland Identification and Yield Forecasting in Mediterranean African Countries, Photogram. Eng. Remote Sens. 67:5:593-602.

Prince, S.D. 1990. High Temporal Frequency Remote Sensing of Primary Production Using NOAA AVHRR, *Applications of Remote Sensing in Agriculture.* M.D. Steven and J.A. Clark, eds. Butterworths London, U.K. 4:169~183.

Scharf, P. and J. Lory. 2000. Calibration of Remotely Sensed Corn Color to Predict Nitrogen Need, Proceedings of 5th International Conference on Precision Agriculture.

Staggenborg, S. and R. Taylor. 2000. Predicting Grain Yield Variability Using Infrared Image, CD-ROM, Proceedings of 5th International Conference on Precision Agriculture, Minneapolis, MN, USA.

Serrano, L., I. Filella and J. Penuelas. 2000. Remote Sensing of Biomass and Yield of Winter Wheat Under Different Nitrogen Supplies. Crop Sci. 40:723-730.

Tucker, C. J. 1979. Monitoring Corn and Soybean Development with Hand-held Radiometer Spectral Data. Remote Sens. Environ. 8:237-248.

Yang, C. and James Everitt. 2000. Relationships Between Yield Monitor Data and Airborne Multispectral Digital Imagery, CD-ROM, Proceedings of 5th International Conference on Precision Agriculture. Minneapolis, MN, USA.

Rice Yield Estimation Using SPOT and DUNCAN Imagery

Chi-Nan Wu*, Kuo-Hsin Hsiao and Tzu-Yi Liao
Geospacial Information Technology Lab., Energy & Resources Laboratories,
Industrial Technology Research Institute, Chutung, Hsinchu, Taiwan, ROC
E-mail: 690398@itri.org.tw

ABSTRACT

Rice yield models, derived by means of multiple regression using NDVI, RVI and TVI indices transformed from SPOT and Duncan imagery, were adopted to predict and compare with actual yield of the normal and varied nitrogen fertilized paddies. Duncan imagery acquired on Apr. 18 and May 28, 2002 which were corresponding to maximum tillering stage and grain filling stage, respectively, were radiometrically calibrated and geometrically corrected before models development. Two yield models were derived for all imaged paddies and the varied nitrogen fertilized paddies, respectively, for each date. The results show that the yield RMS error derived from the two dates for all paddies models were 0.436 and 0.229 MT/ha, respectively, and the RMS error for the varied nitrogen fertilized paddies were 0.967 and 0.989 MT/ha, respectively. The error sources might be from yield sampling error and BRDF effect. On the other hand, the models developed from fy89 2'nd crop and fy91 1'st crop were employed to predict the yield of fy91 2'nd crop and fy92 1'st crop, respectively. The RMS errors of the yield estimated from multi-dated SPOT models for the fy91 2'nd crop were 0.738, 0.717 and 0.719 MT/ha, respectively, and the RMS errors of the yield estimated from multi-dated SPOT models for the fy92 1'st crop were 0.706, 1.409, 0.791 and 0.530 MT/ha, respectively. For the last case, when the outlier of #89 paddy, which was nitrogen deficient and none additional fertilization, was removed, then the RMS error of the yield was down to 0.437 MT/ha. In conclusion, it was found that the high resolution Duncan imagery was better for yield prediction when all paddies, including varied nitrogen fertilized paddies, were adopted for model development; however, as the previously developed SPOT models hadn't considered the paddies of varied nitrogen applications, the yield prediction was worse for those paddies. The following study this year will include those paddies for model development and yield verification.

Key words: Rice yield, Regression analysis, Remote sensing.